

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta chemická

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2019

Marie Olejníková



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA CHEMICKÁ

FACULTY OF CHEMISTRY

ÚSTAV FYZIKÁLNÍ A SPOTŘEBNÍ CHEMIE

INSTITUTE OF PHYSICAL AND APPLIED CHEMISTRY

TIŠTĚNÉ IZOLAČNÍ MEZIVRSTVY

PRINTED INSULATING INTERLAYERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Marie Olejníková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Dzik, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Číslo práce: FCH-BAK1361/2018
Ústav: Ústav fyzikální a spotřební chemie
Studentka: **Marie Olejníková**
Studijní program: Chemie a chemické technologie
Studijní obor: Spotřební chemie
Vedoucí práce: **doc. Ing. Petr Dzik, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

Název bakalářské práce:

Tištěné izolační mezivrstvy

Zadání bakalářské práce:

1. Prostudujte relevantní literární zdroje a sestavte rešerši shrnující současný stav poznání o tištěných izolačních mezivrstvách
2. Navrhněte a optimalizujte kapalnou formulaci vhodnou pro materiálový tisk izolační mezivrstvy založené na titaničitanu barnatém
3. Připravte vzorky izolačních mezivrstev materiálovým tiskem
4. Prostudujte vlastnosti připravených vzorků a optimalizujte proces jejich výroby

Termín odevzdání bakalářské práce: 24.5.2019

Bakalářská práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu. Toto zadání je součástí bakalářské práce.

Marie Olejníková
student(ka)

doc. Ing. Petr Dzik, Ph.D.
vedoucí práce

prof. Ing. Miloslav Pekař, CSc.
vedoucí ústavu

V Brně dne 31.1.2019

prof. Ing. Martin Weiter, Ph.D.
děkan

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá přípravou a studií tištěných izolačních mezivrstev na bázi titaničitanu barnatého. Zkoumalo se složení inkoustových formulací a způsob depozice, které měly vliv na výsledné vlastnosti vrstev. Složení bylo optimalizováno pomocí typu přidaného pojiva. Tisk byl zprostředkován pomocí metody sítotisku. Charakterizace připravených vrstev byla provedena za použití kontaktní profilometrie a optické mikroskopie. Dielektrické vlastnosti vrstev byly následně analyzovány metodou impedanční spektroskopie.

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with preparation and study of printed insulating interlayers based on barium titanate. The composition of ink formulation and method of deposition were investigated. The composition was optimised with the type of added binder. The printing was made using a screen printing method. Characterisation of prepared layers was made using contact profilometry and optical microscopy. Dielectric properties of layers were subsequently analysed using the impedance spectroscopy method.

KLÍČOVÁ SLOVA

Titaničitan barnatý, izolační vrstvy, materiálový tisk, sítotisk, impedanční spektroskopie

KEYWORDS

Barium titanate, insulating layers, material printing, screen printing, impedance spectroscopy

OLEJNÍKOVÁ, M. Tištěné izolační mezivrstvy. Brno, 2019. 34 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav fyzikální a spotřební chemie. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Dzik, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citovala. Bakalářská práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího diplomové/bakalářské práce a děkana FCH VUT.

.....

podpis studenta

Poděkování:

Ráda bych zde poděkovala vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Petrovi Dzikovi, Ph.D. za jeho odborné vedení, čas a vstřícný přístup při tvorbě této práce. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Janovi Pospíšilovi, Ph.D. za cenné rady a pomoc při měření vzorků a také kolektivu lidí z laboratoře 3078 za sdílení jejich zkušeností.

OBSAH

1	ÚVOD	6
2	TEORETICKÁ ČÁST	7
2.1	BaTiO ₃	7
2.2	Elektrotechnický princip izolantů	8
2.2.1	Elektrická vodivost látek	8
2.2.2	Polarizace dielektrik	8
2.2.3	Vlastnosti dielektrik a izolantů	9
2.3	Tištěná elektronika	10
2.4	Depozice vrstev	10
2.4.1	Sítotisk	11
2.4.2	Inkjetový tisk	12
2.5	Současný stav problematiky	13
2.6	Použité analytické metody	15
2.6.1	Profilometrie	15
2.6.2	Optická mikroskopie	15
2.6.3	Impedanční spektroskopie	15
3	CÍL PRÁCE	17
4	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	18
4.1	Použité materiály a přístroje	18
4.1.1	Chemikálie	18
4.1.2	Vybavení laboratoře	18
4.1.3	Software	18
4.2	Příprava vzorků	19
4.2.1	Příprava BaTiO ₃ pasty	19
4.2.2	Depozice vrstev	21
4.2.3	Ošetření vrstev	24
4.3	Měření vzorků	24
4.3.1	Optická mikroskopie	24
4.3.2	Profilometrická měření	24
4.3.3	Impedanční spektroskopie	24
5	VÝSLEDKY A DISKUZE	26
5.1	Optická mikroskopie	26
5.2	Profilometrická měření	27
5.3	Impedanční spektroskopie	29
6	ZÁVĚR	31
7	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	32
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	34

1 ÚVOD

Tištěná elektronika je stále rychle se rozvíjející technologie, která představuje vysoký potenciál z hlediska aplikovatelnosti kombinovaných elektrotechnických součástek s různými vlastnostmi a funkcemi. Jedná se o technologii spojující znalosti nanášecích (tiskových) technik a elektrických vlastností látek. Výhodou oproti komerčně vyráběné spotřební elektronice je především nižší finanční nákladnost a vysoká flexibilita procesu.

Příprava izolačních vrstev představuje nezanedbatelný krok při produkci tištěných elektronických součástek. Izolační mezivrstvy jsou běžnou součástí multivrstvých tištěných struktur, které se vyznačují vysokými hodnotami elektrické kapacity. Zároveň zabraňují průniku proudu a slouží tak k izolaci mezi vodiči. Pro co největší účinnost izolace by vrstva měla být především dokonale kompaktní. Materiály, vhodné pro přípravu izolačních vrstev, se volí v závislosti na oblasti jejich použití, obecně jsou vyžadovány dobré dielektrické vlastnosti.

Teoretická část práce je věnována základním poznatkům, které popisují princip izolačních vrstev. Nejprve je popsán vliv struktury izolačního materiálu titaničitanu barnatého (BaTiO_3), používaného v této práci, na jeho dielektrické vlastnosti. Poté je vymezen pojem izolant a dielektrikum, jejich vlastnosti a chování v elektrickém poli. Následující kapitoly se poté zabývají samotným principem tištěné elektroniky, včetně typických metod přípravy vrstev a současného stavu této problematiky. Podrobněji jsou posány v současnosti zdaleka nepoužívané metody tisku vrstev, a to sítotisk a inkjetový tisk. Nakonec je nastíněn hrubý popis principu metod, používaných pro charakterizaci vrstev v této práci. Experimentální část se poté týká vlastních experimentálních postupů při zpracování této práce.

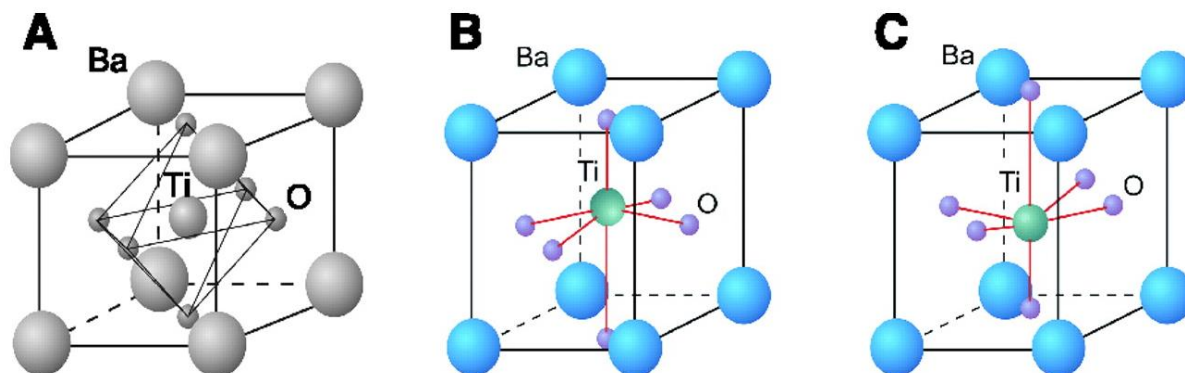
2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 BaTiO₃

Titaničitany s obecným vzorcem $M^{II}\text{TiO}_3$ neobsahují ve své struktuře ionty TiO_3^{2-} , nýbrž jedná se o podvojné (směsné) oxidy kovů M^{2+} a Ti^{4+} . Titaničitan barnatý (dále jen BaTiO₃) patří mezi perovskitové materiály, které jsou strukturně odvozeny od minerálu perovskit (CaTiO₃).

Obecný stechiometrický vzorec perovskitů je $\{\text{ABO}_3\}$, kde A a B tvoří ionty kovů. Elementární buňku tvoří kubická struktura s ionty A v rozích, ionty O ve středech hran a ionty B v centru krychle. Každý B ion je oktaedricky koordinován šesti O ionty, přičemž stabilitu výsledné struktury ovlivňuje inkorporace relativně velkého iontu A. Perovskitová krystalická struktura je tedy upřednostňována pouze u sloučenin, kde se přítomné kovové ionty velikostně značně liší. Například ilmenit (FeTiO_3) obsahuje ionty srovnatelné velikosti, a proto krystalizuje ve struktuře typu korundu. Mnoho perovskitových materiálů disponuje kubickým krystalografickým uspořádáním pouze při vyšších teplotách, při nižších teplotách se mohou vyskytovat změny v symetrii.

Vzhledem k vysokému iontovému poloměru barnatého iontu dochází k anomálnímu rozdílu ve velikostech mezi ionty Ba^{2+} a Ti^{4+} , což vede ke strukturním deformacím. Se zvyšující se teplotou přechází krystalová soustava BaTiO₃ z tetragonální na kubickou (perovskitovou). Tetragonální uspořádání je způsobeno vychýlením titaničitého iontu ze středu symetrie a vytvořením jedné krátké Ti-O vazby (viz Obrázek 1).^{1,2}



Obrázek 1: Krystalová struktura BaTiO₃ s kubickým uspořádáním (A) a tetragonálním uspořádáním při polarizaci v rovině směrem nahoru (B) nebo dolů (C) se znázorněním přesunu Ti iontu vlivem polarizace.³

Důsledkem je vznik permanentního elektrického dipólu, který přetrvává i v absenci vnějšího elektrického pole. Obecně se jedná o pyroelektrický jev, vyznačující se spontánní polarizací v určitém rozmezí teplot.

BaTiO₃ se řadí mezi feroelektrika. Vektor spontánní polarizace u feroelektrik zaujímá několik orientací, které lze měnit v závislosti na intenzitě vnějšího elektrického pole. Přechod mezi feroelektrickou tetragonální a kubickou fází udává tzv. Curieho teplota, a proto ke spontánní polarizaci může docházet pouze při teplotách nižších, než je Curieho teplota daného dielektrika.⁴

2.2 Elektrotechnický princip izolantů

2.2.1 Elektrická vodivost látek

Veškeré látky se na základě jejich chování ve vnějším elektrickém poli obecně rozdělují na vodiče a nevodiče (izolanty). Vodiče vykazují vysokou elektrickou vodivost, a proto jsou schopné vést elektrický proud. Důvodem je přítomnost volně pohyblivých nosičů náboje v podobě iontů nebo volných (valenčních) elektronů. Oproti tomu, izolační látky vykazují vodivost velice nízkou, jelikož kladou vůči působení elektrického pole určitý odpor. Reálné izolanty sice volné nosiče elektrického náboje obsahují také, ale v relativně velmi zanedbatelném množství. Schopnost vést elektrický proud je primárně dána skupenstvím a chemickou strukturou daného materiálu.

Elektrická vodivost pevných látek souvisí s rozložením tzv. energetických pásů, tedy hladin energie elektronů v molekule. Pro popis vlivu pásové struktury na vodivost je potřeba znát dvě nejvyšší dovolená pásma, a to konkrétně pás valenční a vodivostní. U vodičů se tyto pásy překrývají, což umožňuje snadné uvolnění elektronů z atomové struktury. Pásová struktura izolantů má jiné rozložení, které znemožňuje uvolňování elektronů. Valenční a vodivostní pás odděluje region, ve kterém nemohou existovat elektronové orbitály, nazývaný jako zakázaný pás. Pro překonání takového regionu je zapotřebí energie odpovídající šíři zakázaného pásu. Ta je pro různé materiály specifická, přičemž u izolantů dosahuje hodnot větších než 5 eV. Přechodovou skupinou látek mezi vodiči a nevodiči jsou polovodiče. Šíře zakázaného pásu u polovodičů je podstatně nižší než u izolantů, a proto se mohou dodáním potřebné energie (např. tepelné) stát elektricky vodivými.^{5,6}

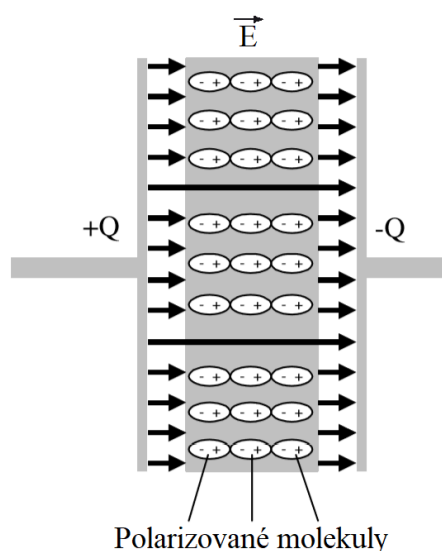
Izolanty sice nepřenášejí volné náboje, nicméně působení vnějšího elektrického pole na ně má jistý efekt, a to formou polarizace. Látky vyznačující se polarizací se nazývají dielektrika. Pojmy izolant a dielektrikum znamenají v podstatě to samé, označení se liší zejména z hlediska technického použití. Izolanty slouží k izolaci vodičů a zabránění zkratu, dielektrika se využívají v souvislosti s akumulací energetické energie v kondenzátorech. Studium izolačních prvků je proto doprovázeno charakterizací veličin, které jsou přidělovány vlastnostem dielektrických materiálů.⁷

2.2.2 Polarizace dielektrik

Polarizace dielektrika je způsobena pohybem vázaných nosičů náboje vlivem vnějšího elektrického pole. Doprovází ji tvorba elektrických dipólů, která je důsledkem narušení symetrie nábojů v molekule. Vznik těchto dipólů závisí na struktuře a polaritě dielektrik. Polárních dielektrika mají vázané náboje rozloženy tak, že molekula disponuje vlastním permanentním dipólovým momentem. Molekulové dipóly jsou však nahodile orientované, přičemž účinkem elektrického pole dochází k jejich rovnoměrnému rozložení. U nepolárních dielektrik je pak tvorba dipólů indukována vlivem elektrického pole.

Mechanismus polarizace si lze představit v uspořádání tzv. deskového kondenzátoru, které je tvořeno dvěma vodivými deskami oddělenými dielektrikem. Jedná se o homogenní elektrické pole (uvažujeme-li relativně velký plošný obsah desek), jehož silový účinek na nosiče náboje je dán vektorem intenzity působícím směrem od kladně nabitě k záporně nabitě

desce. Vložíme-li do takového pole dielektrikum, jednotlivé vázané náboje tvořící mikroskopické dipóly se začnou orientovat tak, aby směr vektorů dipólového momentu odpovídal polohovému vektoru elektrické intenzity. Kladné náboje se tedy vychýlí z rovnovážné polohy blíže k záporné desce, záporné náboje zase ke kladné desce (viz Obrázek 2). Na rozdíl od volných nábojů u vodičů se však tyto náboje pohybují v omezených vzdálenostech v rámci velikosti dané molekuly. Výsledný dipólový moment je ve výsledku tvořen pouze povrchovými náboji, jelikož dojde v celém objemu dielektrika k vyrovnání sousedících nábojů s opačným znaménkem. Výsledná intenzita elektrického pole s polarizovaným dielektrikem je proto dána rozdílem velikostí intenzit původního homogenního pole bez dielektrika a vlastního elektrického pole dielektrika vytvořeného polarizací.⁸



Obrázek 2: Znárodnění uspořádnání dipólů dielektrika v homogenním elektrickém poli.

2.2.3 Vlastnosti dielektrik a izolantů

Hlavním parametrem dielektrik je relativní permitivita ϵ_r . Jedná se o jistý koeficient, který udává míru zvýšení kapacity kondenzátoru po nahrazení vakua dielektrikem. Po vztažení na permitivitu vakua ($\epsilon_0 \sim 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$) potom pro výslednou neboli absolutní permitivitu dielektrika platí vztah:

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (1)$$

Kapacita kondenzátoru C kvantitativně vyjadřuje velikost náboje Q , které se při napětí U nahromadí na vodičích. Zároveň je kapacita závislá na geometrických rozměrech kondenzátoru, tedy plošném obsahu desek S a vzdálenosti d mezi nimi. Platí vztah:

$$C = \epsilon \frac{S}{d} = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{S}{d} \quad (2)$$

Měrný elektrický odpor typických izolantů se řádově pohybuje v rozmezí 10^7 - $10^{16} \Omega \cdot \text{m}$. Dalšími parametry, které charakterizují kvalitu individuálních izolantů, jsou ztrátový činitel a elektrická pevnost. Ztrátový činitel $\tan \delta$ udává, kolik elektrické energie disipuje dielektrický materiál v elektrickém poli na teplo. Elektrická pevnost E_P limituje maximální povolené

intenzitu elektrického pole, kterou izolační materiál ještě snese, tedy než nastane jeho průraz. U materiálů s vysokým ztrátovým činitelem může být průraz vyvolán i tepelně.⁷

2.3 Tištěná elektronika

Technologie tištěné elektroniky představuje relativně novou vědeckou oblast, jejíž aplikovatelnost je rozmanitá. Spočívá v produkci vrstvených integrovaných elektronických obvodů a struktur za pomoci nanášecích a tiskových technik. Funkční komponenty zde tedy tvoří elektricky aktivní kompozitní materiály, deponované na substrát ve formě funkčních vrstev. Tyto vrstvy tedy mohou být vodivé, polovodivé nebo izolační. Nejedná se však o úplnou náhradu konvenční elektroniky, která má stále v porovnání s elektronikou tištěnou vyšší účinnost. Nicméně, účelem a výhodou této metody je nízké finanční zatížení procesu. Zároveň disponuje vysokou flexibilitou a variabilitou, a to z hlediska používaných materiálů, substrátů nebo depozičních technik.¹⁷

Aplikace tištěné elektroniky by se dala shrnout do několika oblastí¹⁸:

- Elektronické prvky a obvody
- Multivrstvé struktury
- Identifikace na radiové frekvenci
- Elektronické senzory a displeje

2.4 Depozice vrstev

Z důvodu popisu principu nanášení funkčních vrstev, které tvoří funkční komponenty v tištěné elektronice, na substrát se obecně tyto technologické metody rozdělují dle relativní tloušťky na dva základní typy – tenkovrstvé technologie (tloušťka vrstev v řádech do stovek nanometrů) a tlustovrstvé technologie (tloušťka v řádech od několika mikrometrů). Je však nutno poznamenat, že v praxi se všechny typy nanášených vrstev (i ty připravené tlustovrstvými technologiemi), obecně označují jako tenké vrstvy.

Tenkovrstvé technologie se spočívají v aplikaci velmi kontrolovaných procesů pro přípravu velmi tenkých monolitických vrstev. Preciznost této metody je zapříčiněna samostatným pohybem a depozicí individuálních funkčních částic. Podmínky nanášení bývají časově i nákladově náročné. Patří sem technologie vakuového napařování a katodového naprašování.

Tlustovrstvé technologie představují, co se rozvoje a optimalizace týče, rozmanitější typ postupů při přípravě hybridních struktur na bázi vodivých a nevodivých struktur. Pro depozici se kombinují metody nanášecí (*coating*) a materiálový tisk. Nanášecími metodami bývá spin coating, dip coating nebo spray coating. Materiálový tisk využívá konvenčních tiskových technik, přičemž místo inkoustových barviv zde inkoust tvoří jistou kapalnou formulaci složenou z funkčních materiálů. Běžně používanými metodami materiálového tisku jsou sítotisk a inkjetový tisk (podrobně popsány v kapitolách 2.4.1 a 2.4.2), dále pak ofsetový tisk, hlubotisk nebo flexotisk.⁷

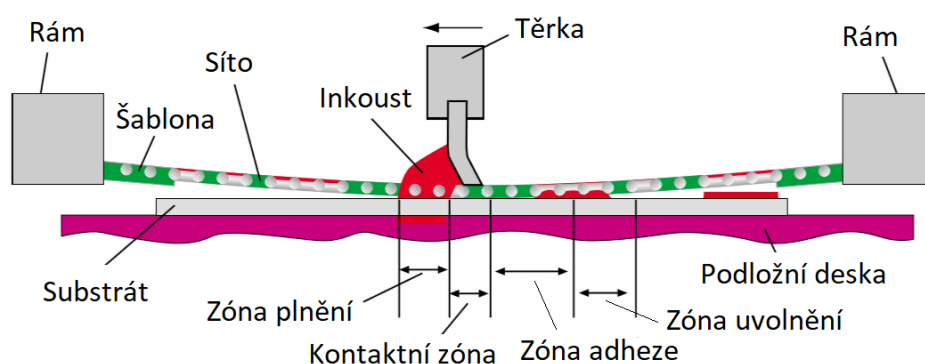
Hlavním faktorem, ovlivňujícím výsledné vlastnosti tenkých vrstev, je složení inkoustu. Obecně materiálový inkoust tvoří disperzní soustavu plnidla a pojiva, tedy určitého funkčního prášku v nosném (kapalném) médiu. Kapalně médium zajišťuje stabilitu a snadnou aplikovatelnost inkoustu na substrát a jeho hlavní složkami jsou organické pojivo a

rozpouštědlo, případně další speciální přísady (aditiva). Pojivo je primárním původcem správných reologických vlastností tištěných materiálů, které ovlivňují manipulovatelnost při tisku a tvorbu homogenního filmu ulpívajícím pevně na substrátu. Nároky na reologické vlastnosti inkoustů se liší podle použité tiskové technologie, např. u sítotisku by se viskozita měla pohybovat kolem 1,5-2 Pa·s, u inkjetového tisku se naopak používají nízkoviskózní kapaliny. Dále pojivo v inkoustech slouží k uchycení dispergovaných částic plnidla, které tvoří hlavní složku tištěných vrstev. Rozpouštědla se volí s ohledem na kompatibilitu s použitým pojivem a mělo by mít vyšší teplotu varu, než je pracovní teplota laboratoře, aby se z inkoustu nevypařovalo už při samotném tisku.⁹

2.4.1 Sítotisk

Metoda sítotisku je založena na protlačení materiálu přes šablonu. Používá se k tomu speciální tisková forma neboli síto, tvořené síťovinou upnutou v pevném rámu. V definovaných místech překrývá síťovinu šablonový film určující tvar a tloušťku natištěné vrstvy. Pohyb inkoustové barvy na sítu a její rovnoměrný průtisk zajišťuje kolmo na síto umístěná těrka, přesněji těrkový list upevněný v těrkovém držáku.

Síťovina je tkaná síť, která musí vyhovovat podmínkám mechanické stability (např. vůči tlaku) a chemické kompatibility se šablonovým a tištěným materiálem. Většinou to jsou tkaniny z plastických vláken nebo kovových drátů. Příprava šablony nejčastěji spočívá v nanesení fotocitlivé emulze na síťovinu a v selektivním vytvrzení pod UV zdrojem. Usušená vrstva se přikryje fotografickým filmem s pozitivním obrazem tiskového motivu a nechá se působit vlivu záření, čímž dojde k vytvrzení pouze nekrytých míst (pod transparentními částmi filmu) emulze. Šablona se nakonec vyvolá opláchnutím nevytvrzené vrstvy pomocí proudu vody. Těrka se vyrábí se z polyurethanového elastomeru a jejími hlavními parametry jsou tvrdost, délka a profil. Tvrdost ovlivňuje množství přenesené barvy. Délka se volí s ohledem na rozměry tištěného motivu (přesah na každé straně asi o 3-5 cm). Profil určuje přizpůsobivost k povrchu substrátu, nejčastěji se používá pravoúhlý.



Obrázek 3: Průběh procesu plošného sítotisku.¹⁰

Obrázek 3 znázorňuje proces tisku přes síto a jeho jednotlivé části. Potřebný objem materiálu (inkoustové barvy) je nejprve nanesen na místa pokrytá šablonou, aby samovolně neprotékal přes síto na podklad se substrátem. Ručním či automatizovaným pohybem těrky se inkoust následně tlačí směrem přes tisknoucí místa v sítu a v místech před těrkou proniká v zóně plnění do ok síťoviny, dokud v kontaktní zóně nedojde k průtisku na substrát. Oblast za

těrkou vymezuje zóna adheze a uvolnění, kdy se síto postupně uvolňuje od povrchu substrátu, na kterém poté zůstává rovnoměrná vrstva inkoustu.

Princip sítotisku je poměrně jednoduchý, nicméně tloušťku a kvalitu natištěné vrstvy ovlivňuje hned několik faktorů:

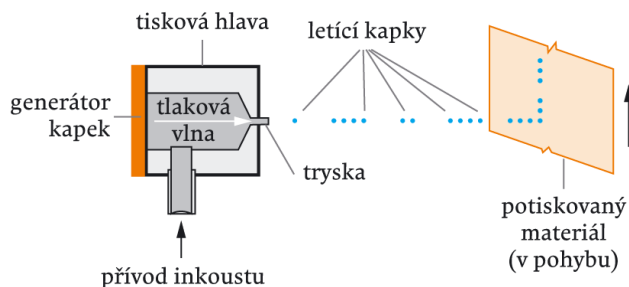
- Geometrie sítoviny
- Tloušťka šablonového filmu
- Míra odtrhu síta
- Přítlak a rychlost těrky
- Ostrost hrany těrkového listu

Tloušťka vrstvy (běžně v řádech několika až několika desítek mikrometrů) je podmíněna množstvím barvy protlačené přes sítovinu, jejímž hlavním parametrem je šíře ok. Ta se uvádí s ohledem na hustotu sítovinu, která se vyjadřuje jako počet vláken na jednotku délky, a tloušťku vláken (v μm). K dispozici je široké spektrum sítovin s hustotou v rozmezí od 10 až do 200 vláken/cm. Čím širší oka má zvolená sítoovina, tím méně barvy se tedy protiskne. Dalšími parametry, které ovlivňují, jak vysoká se natiskne vrstva, je tloušťka šablonového filmu nebo míra odtrhu síta. Odrhem se myslí vzdálenost síta od potiskovaného substrátu. Na kvalitu vrstvy má velký vliv především pohyb těrky používané při tisku. Optimální rychlost a přítlak těrky proto zajišťuje, aby současně s kompaktním nánosem tištěného materiálu nedošlo k narušení síta nebo substrátu. Pro rovnoměrný přetisk je také nutné použít těrkový list s ostrým profilem.

V závislosti na tvaru síta a podkladu se mechanismus sítotiskových strojů rozděluje na tisk plošný, rotační a kombinovaný. Plošně se tiskne na sklopných strojích a strojích s rovnoběžným zdvihem, rotačně na strojích se sítem ve formě otáčejícího se dutého válce s těrkou a barvou uvnitř. Stroje s plošným sítem, ale kulovým podkladem se řadí mezi kombinované. Podkladem bývá buď rotující cylindr, na kterém se pohybuje substrát, nebo je kulového tvaru samotný substrát.^{10,11}

2.4.2 Inkjetový tisk

Inkjetový (případně inkoustový) tisk spadá mezi digitální tiskové techniky. Pro přenos tištěného materiálu se nepoužívá tisková forma a jako předloha zde slouží určitý digitální motiv. Jedná se proto o bezkontaktní metodu, která je založena na řízené produkci a aplikaci barvy ve formě kapiček pomocí trysek (viz Obrázek 4). Trysky tvoří hlavní komponentu inkjetové tiskárny a jsou umístěny přímo nad podkladovým substrátem. Reprodukci obrazu zajišťuje nános kapiček v těsně uspořádaných liniích, které se pro homogenitu vrstvy mohou i vzájemně překrývat.



Obrázek 4: Princip inkjetového tisku.¹¹

Existují dva technologické způsoby tisku pomocí trysek:

- Kontinuální tisk
- Drop on demand

Při *kontinuálním tisku* dochází ke konstantní tvorbě proudu kapek. Kapky tvořící negativní obraz tiskového motivu jsou nepotřebné, a proto se musí určitým způsobem vychýlit z dráhy vedoucí k substrátu. Vychylování se provádí za pomoci dvou párů elektrod, a to buď binárně nebo vícenásobně. U binárního vychylování dochází k nabití nepoužitelných kapek, díky čemuž jsou poté pomocí následně zařazeného elektrického pole odděleny do sběrného zařízení. Nenabité kapky během procesu nezmění směr a dopadají tak na substrát. Při vícenásobném vychylování se zachycují nenabité kapky, zbylé kapky se vychylují v závislosti na velikosti dodaného náboje.

Technologie *drop on demand* využívá pro tisk všechny kapky, jež jsou aplikovány v řízených pozicích (danými pozitivním obrazem motivu). Podle způsobu vytlačení kapek z trysky se dělí na termální a piezoelektrický tisk, ve vývoji je i elektrostatický tisk. Termálně dochází k tlakovému podnětu vlivem odparu rozpouštědel barvy. Na mechanickém výtlačku fungují trysky s piezoelektrickým krystalickým materiálem. Díky obrácenému piezoelektrickému jevu se vlivem vnějšího elektrického napětí změnil tvar krystalu, následkem je tlaková změna v objemu barvy a vytlačení kapky. Předností piezoelektrických trysek je univerzálnost použitých tištěných materiálů a možnost řízení a optimalizace velikosti a tvaru kapek.^{10,11}

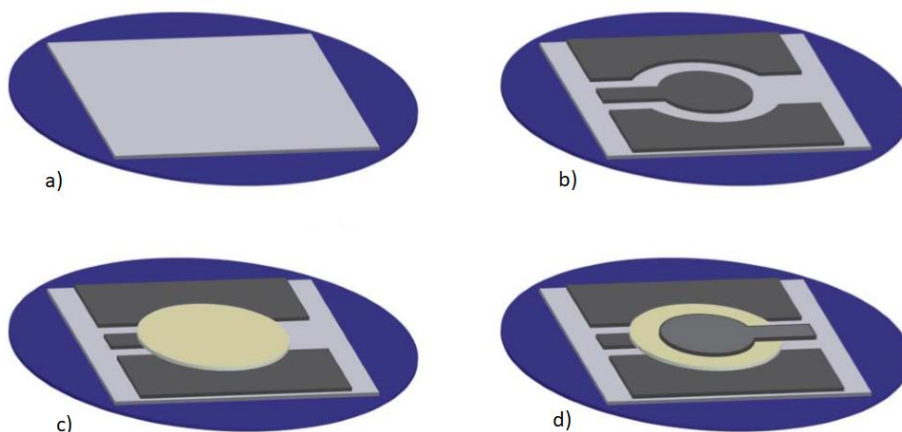
2.5 Současný stav problematiky

Dielektrika se v tištěné elektronice uplatňují jako kondenzátory a izolační vrstvy, podmínkou přípravy jejich vrstev je však nutná zpracovatelnost dielektrických materiálů v roztoku. Běžnými látkami, které vykazují dielektrické vlastnosti a mají vysoké hodnoty ϵ_r , jsou oxidy kovů. Jedná se například o sloučeniny BaTiO_3 , SrTiO_3 , ZrO_2 , HfO_2 , TiO_2 , Y_2O_3 , Al_2O_3 nebo SiO_2 . Tyto látky však samy o sobě tisknutelné nejsou. Oproti tomu, organická dielektrika se ve vhodném rozpouštědle tisknou poměrně snadno, nedisponují ale vysokými hodnotami ϵ_r . Běžnými zástupci těchto materiálů jsou polyvinylfenol, polymetakrylát, polyethylen, tereftalát, polyimid, polyvinylalkohol a polystyren.²⁰

V současnosti proto probíhá snaha o nahrazení konvenčních depozičních metod tvorby dielektrických vrstev, jako je třeba vakuové napařování, a to méně nákladnými metodami nanášecími a materiálového tisku. Významným řešením aplikovatelnosti dielektrických materiálů v tisku jsou kompozity nanočástic oxidů kovů, dispergovaných ve vhodné polymerové matici.¹⁹

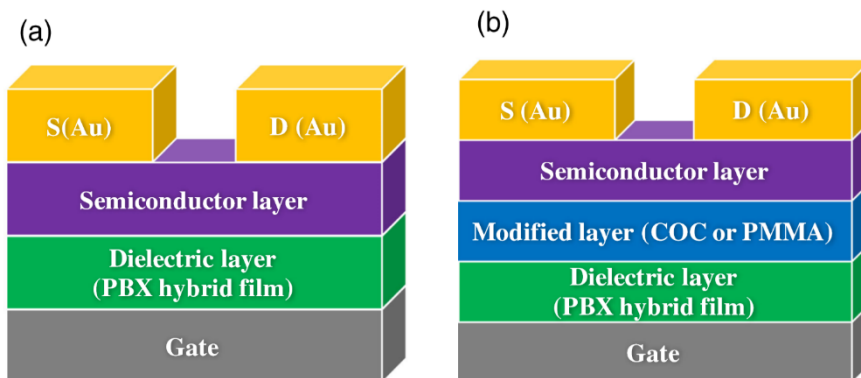
Často se pro dielektrické vrstvy na bázi oxidů kovů využívá metody sol-gel. Ta je založena na přípravě suspenze (solu) oxidů kovů, která je poté převedena na viskózní gel a následně na po depozici na substrát na tvrdý povlak. Bylo zveřejněno mnoho publikací, které zabývají přípravou dielektrických vrstev pomocí metody sol-gel, například²⁴. Funkční složkou zde byl oxid hlinitý a měření bylo prováděno na MIM kondenzátoru.

Přípravu typického vrstveného kondenzátoru kov-izolant-kov (MIM) popisuje článek²². Pro přípravu tištěného kondenzátoru byla použita technika inkjetového tisku. Pro tisk elektrod se používal komerčně dostupný inkoust s 20% hmotnostním nanočástic stříbrného prášku ve směsi rozpouštědel ethanolu a ethylen glykolu. Dielektrická vrstva se tiskla pomocí směsi polyvinylfenolu a melaminové pryskyřice v různých hmotnostních poměrech. Tloušťka vrstev činila 500 nm pro elektrody a 800 nm pro dielektrickou vrstvu.



Obrázek 5: Postup přípravy MIM kondenzátoru – připravený čistý substrát (a), tisk spodní elektrody (b), tisk dielektrické vrstvy (c) a přetisk vrchní elektrody (d). (převzato z ²²)

Dielektrické vrstvy se také významně uplatňují jako funkční složka organických tenkovrstvých tranzistorů (OTFTs). V publikaci²³ z roku 2016 byl proveden pokus o zlepšení dielektrických vlastností OTFTs zavedením organického/anorganického kompozitního materiálu, připraveného sol-gel procesem. Organickou složku tvořil polyimid (PI), který se pro dobrou tepelnou i chemickou odolnost často používá jako izolant elektronických součástek. Nanočástice BaTiO₃ zde sloužily jako plnidlo, zvyšující celkovou relativní permitivitu hybridního materiálu. Pro zlepšení operační stability struktury se dielektrické vrstvy navíc modifikovaly izolanty s volnými hydroxylovými skupinami, konkrétně polymethylmetakrylátem (PMMA) a cyklickým kopolymerem olefinu (COC).



Obrázek 6: Struktura OTFTs: Gate – elektroda, Dielectric layer (PBX hybrid film) – dielektrická vrstva (PBX hybridní film), Semiconductor layer – polovodičová vrstva, S(Au) – vstupní Au elektroda, D(Au) – výstupní Au elektroda.²³

Reologickými vlastnostmi sítotiskových past na bázi nanočástic BaTiO_3 se zabýval tým vědců z Ukrajiny¹⁶. Studoval se vliv přídavku změkčovadel, které jsou schopné měnit chování pojiva a zlepšovat tak celkovou tisknutelnost pasty. Zkoumaným pojivem byla například velmi často používaná etylcelulóza, jejíž filmy bývají křehké a tepelně málo stabilní. Po přídavku změkčovadla dibutylftalátu došlo k částečnému narušení intermolekulárních sil ve struktuře pojiva, čímž polymerní řetězce nabyly na zvýšené mobilitě. Výsledná reologie vypovídala o neneutronovském chování pasty, a v závislosti na koncentraci přidaného DBP byla reopexní, pseudoplastická nebo tixotropní. Tixotropní chování sítotiskové pasty bývá podmínkou pro optimální tisk, a proto by další vývoj ve studiu přídavku změkčovadel mohl vést k lepším podmínkám pro sítotiskem tištěné vrstvy.

2.6 Použité analytické metody

2.6.1 Profilometrie

Metoda profilometrie je založena na topografické charakterizaci povrchů. Měří se tak distribuce prohlubin a vyvýšenin neboli povrchová drsnost. Lze tak určovat i tloušťku tenkých vrstev, která je daná střední odchylkou výšky vrstvy od referenční (nulové) hladiny substrátu. Stejným principem by se dala určovat i hloubka vrypů. Tloušťka a struktura tištěných vrstev má zásadní vliv na celkovou funkčnost struktur, které z nich sestávají. Princip profilometrické instrumentace se vzhledem k uspořádání měřících přístrojů dělí na kontaktní a bezkontaktní (optickou).

Kontaktní profilometrie spočívá v mechanickém skenování povrchu pomocí hrotu (tzv. stylus), který se pohybuje nad měřeným povrchem po určité dráze a definovaným přtlakem se ho v definovaných místech dotýká. Počet snímaných míst vztažených délku dráhy vypovídá o velikosti rozlišení naměřeného profilu. Hlavní nevýhodou kontaktní profilometrie je případné narušení povrchu hrotem. Bezkontaktní profilometrie využívá optické metody založené na detekci a interpretaci interakce povrchu se zářením.^{12,13}

2.6.2 Optická mikroskopie

Pro snadné a rychlé zobrazení materiálových struktur v mikroskopickém měřítku (rozlišovací schopnost dosahuje až hodnoty $0,2\ \mu\text{m}$) se využívá metody optické mikroskopie. Pozorování je zprostředkováno pomocí zdroje viditelného světla, který dopadá na vzorek. Za tvorbu a zobrazení zvětšeného obrazu je poté zodpovědná soustava optických prvků (objektiv, okulár, kondenzor), které jsou tvořeny kombinací čoček a zrcadel.²¹

2.6.3 Impedanční spektroskopie

Studium elektrických vlastností různých druhů kapalných a pevných látek lze zprostředkovat pomocí metody impedanční spektroskopie (IS). Dle typu vodivosti měřeného materiálu se z hlediska teoretického popisu metodiky rozlišuje elektrochemická impedanční spektroskopii (EIS) a typická IS. Iontově vodivé látky, kde je vodivost zprostředkována pohybem volných nábojů ve formě iontů, se charakterizují pomocí EIS. Typickými iontově vodivými materiály jsou elektrolyty, vodivé polymery nebo roztavené soli, které se během analýzy elektrochemicky v jisté koncentraci vrství na kovové elektrodě. EIS nachází uplatnění například při vývoji a procesních kontrolách palivových článků, polovodičových

a senzorových systémů. IS se oproti tomu používá ke studiu složitějších mikrostruktur, kde se uplatňují především vázané náboje a v menší míře i náboje volné. Takové materiály jsou nevodivé nebo vodivé pouze částečně. Významně se tedy IS uplatňuje při charakterizaci dielektrik.^{14,15}

Principem IS je analýza elektrické odezvy materiálů a soustav ve střídavých obvodech. Ta je dána časově proměnnou závislostí proudu a napětí ve střídavých obvodech, jejichž periodický průběh popisují harmonické funkce. Výstupem impedančních měření bývá tzv. impedance Z jako funkce frekvence. Komerčně dostupné přístroje jsou schopné poskytnout funkční závislosti impedancí ve frekvenčním rozsahu v řádech 10^{-3} - 10^6 Hz. Impedance je komplexní veličina, zahrnující složku reálnou (rezistance) a imaginární (reaktance):

$$Z = R + iX \quad (3)$$

Absolutní hodnota impedance obecně souvisí ohmický vztah mezi amplitudami střídavého napětí a proudu. Jedná se tedy o zdánlivý elektrický odpor, který daný materiál ve střídavém obvodu klade proti průchodu proudu.

Řešení střídavých obvodů a interpretace impedančních dat spočívá v porovnávání chování měřeného (reálného) prvku a prvku ideálního, zapojených v jednoduchých ekvivalentních obvodech. Mohou to být obvody s R (rezistorem), L (cívkou), C (kondenzátorem), nebo např. kombinované obvody RL , RC a RLC . O charakteru měřených prvků vypovídá tzv. fázový úhel φ , udávající posun o určitou fázi mezi časovým průběhem procházejícího harmonického střídavého proudu (AC) a indukovaného střídavého napětí. Hodnotu fázového úhlu lze získat jednoduše přepočtem ze složek impedance:

$$\tan \varphi = \frac{X}{R} \quad (4)$$

Pro každou soustavu ideálních prvků se impedance a fázový úhel liší. Fázový úhel střídavého obvodu se zapojeným ideálním rezistorem nabývá hodnoty 0° , s ideální cívkou 90° a s ideálním kondenzátorem hodnoty -90° .⁸

3 CÍL PRÁCE

Cílem této bakalářské práce je prostudovat téma tištěných izolačních mezivrstev. Se získanými znalostmi o technologiích depozice tenkých vrstev a o složení inkoustů poté navrhnout a připravit kapalnou formulaci na bázi titaničitanu barnatého, která se následně použije pro tisk vlastních vzorků. Struktura připravených vzorků je zejména koncipována podle struktury MIM kondenzátoru, který byl zmíněn v kapitole 2.5. Posledním krokem je měření a charakterizace připravených funkčních vzorků tištěných izolačních mezivrstev. Cílem je především určit hodnotu relativní permitivity připravené dielektrické vrstvy, která se dá jednoduše vypočítat ze vzorečků v kapitole 2.2.3. Při vyhodnocení měření kondenzátoru pomocí impedanční spektroskopie je využita znalost interpretace frekvenčních závislostí z kapitoly 2.6.3.

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

4.1 Použité materiály a přístroje

4.1.1 Chemikálie

- Vodivá uhlíková pasta na tisk LOCTITE EDAG PF 407C E&C (Henkel)
- Methyltriethoxysilan (MTEOS), 98% (abcr)
- Kyselina chlorovodíková, 35% (Penta)
- Ethanol absolutní p.a., obsah min 99,8 % (Penta)
- Diethylether, nestabilizovaný, 99,7% (Penta)
- Titaničitan barnatý (Fisher Scientific)
- Dowanol (Sigma-Aldrich)
- Mara Star SR 911 (Marabu)
- Destilovaná voda

4.1.2 Vybavení laboratoře

- Laboratorní sklo
- Mikroskopická podložní sklička 76×26×1 mm (Paul Marienfeld)
- ITO sklička
- Magnetické míchadlo s ohřevem
- Teploměry
- Mikropipety
- Přenosný pH metr Orion Star A221 (Thermo Fisher Scientific)
- Analytické váhy
- Laboratorní třepačka
- Sítotiskový stroj SD 05 (RokuPrint)
- Ultrazvuková čistička PS02000A (NOTUS – POWERSONIC)
- Sušárna horkovzdušná Venticell (BMT Medical Technology)
- Přesná topná deska (Harry Gestigkeit)
- Spin Coater KW-4A (Chemat Technology)
- Přístroj na plazmochemické opracování RPS50+ (CEPLANT)
- Kontaktní profilometr DektakXT (Bruker)
- Digitální multimetr MT-1270 (ProsKit)
- Optický mikroskop s digitálním fotoaparátem D5000 (Nikon)
- Impedanční analyzátor

4.1.3 Software

- Microsoft Office Word
- Microsoft Office Excel
- OriginLab 7.5
- Vision 64
- Camera Control Pro 2.6

4.2 Příprava vzorků

Pro účely experimentu byla navržena struktura tištěného kondenzátoru, kde variabilním prvkem byla dielektrická vrstva na bázi BaTiO_3 sloužící jako mezivrstva mezi dvěma uhlíkovými elektrodami. Složení a příprava dielektrické vrstvy byly v rámci této práce během experimentu optimalizovány. V době experimentu kvůli opravě v laboratoři chyběla inkjetová tiskárna, a proto se pro tisk využívalo pouze technologie sítotisku. Správná funkčnost izolační vrstvy u všech připravených vzorků kondenzátoru byla před jejich dielektrickou analýzou kontrolována pomocí digitálního multimetru, a to měřením izolačního odporu v rozsahu do 200 M Ω . Vzorky s měřitelnou hodnotou odporu v rámci rozsahu multimetru byly považovány za zkratované.

4.2.1 Příprava BaTiO_3 pasty

4.2.1.1 Syntéza organokřemičitého pojiva (SiBi)

Nejprve se jako pojivo do pasty používalo syntézou připravené organokřemičité pojivo na bázi polysiloxanu (dále jen SiBi).

V reaktorové baňce se za současného míchání pomocí magnetického míchadla nechalo smísit 140 ml okyselené vody pomocí HCl na pH v rozmezí 3-3,5 (před syntézou zkontrolováno ručním pH metrem) a 120 ml methyltriethoxysilanu. Následně se baňka uzavřela, aby mohla probíhat hydrolýza za vzniku ethanolu. Konec hydrolýzy indikoval vznik čirého roztoku. Vzniklý ethanol se následně nechal oddestilovat v olejové lázni při teplotě do 135 °C (Obrázek 5). V okamžiku vytvoření mléčného zákalu byla destilace ukončena. V ten moment se přililo 74 ml předem vychlazené destilované vody z chladničky a roztok se nechal chladit ve studené vodní lázni. Při dosažení pokojové teploty následovala extrakce pojiva pomocí 180 ml diethyletheru. Po silném třepání došlo k oddělení na dvě fáze, přičemž spodní vodná fáze byla pomocí pipety odstraněna. Přítomný diethylether se poté nechal oddělit destilací ve vodní lázni při 50 °C. Destilace byla ukončena po odkapání veškerého destilátu. Vzniklý produkt ve formě destilačního zbytku byl nakonec rozpuštěn ve 100 ml absolutního ethanolu pomocí ultrazvukové čističky.



Obrázek 7: Destilační aparatura při syntéze organokřemičitého pojiva.

Pro určení přesné hmotnostní koncentrace pojiva v ethanolu byla poté provedena gravimetrická analýza, a to sušením kapky pojiva na Petriho misce při 120 °C v horkovzdušné sušárně po dobu 3 hodin. Naředěním pomocí potřebného množství ethanolu byla poté koncentrace upravena na 20 %.

4.2.1.2 První tisková formulace

U první experimentální formulace se pracovalo s 20% roztokem pojiva SiBi a disperzí práškového BaTiO₃ v 1-methoxy-2-propanolu (Dowanol PM). V rámci experimentu se pracovalo se 3 variacemi první formulace, a to *formulacemi M, N1 a N2*. Pojivo bylo mícháno jednak s 20% disperzí (formulace M a N1), jednak se 40% disperzí (N2) BaTiO₃. Ve všech případech odpovídal poměr pojivo:BaTiO₃ hmotnostnímu poměru 1:1.

Formulace M: Pro určení vlivu stupně mletí se jedna z připravených kompozic (formulace M) nechala mlít s malými skleněnými kuličkami (v poměru 56 ml formulace na 45 g kuliček) při otáčkách 90 rpm po dobu 48 hodin. Mletá směs se však stala tuhá sraženina (viz Obrázek 6 – vlevo), která měla konzistenci želé. Do objemu bylo proto ve snaze o homogenizaci přidáno 50 ml downolu, čímž byla docílena optimální konzistence pro tisk. Koncentrace takto připravené kapalně formulace byla gravimetricky stanovena na 15 %.

Formulace N1: Druhá, nemletá formulace (formulace N1) se vzhledem k požadavkům na větší viskozitu pasty u sítotisku musela nechat zahustit odpařením rozpouštědel, a to do vytvoření pastovité konzistence. Zahušťování probíhalo zahříváním na magnetické míchačce při maximální teplotě 100 °C. Prvním problémem při práci s touto kompozicí byla velmi špatná omyvatelnost ulpíváním materiálu na skle. Proto jsem kompozici nechala odpařovat v kádince, která se dá poměrně snadno čistit. Při prvním pokusu se směs v určitém okamžiku odpařování nenávratně srazila za vzniku velkých agregátů. Na pokus druhý se velmi opatrným a pomalým zahušťováním povedlo připravit kompozici o optimální viskozitě pro sítotisk, jejíž hmotnostní koncentrace byla gravimetricky stanovena na zhruba 61 %.

Formulace N2: Pro přípravu formulace se využilo 40% disperze BaTiO₃ v downolu, která byla partnery z Centra organické chemie s. r. o. připravena kulovým mletím. Směs se opět nechala zahustit magnetické míchačce. Nicméně, znovu došlo k náhlému sražení a vytvoření velkých a tuhých agregátů (Obrázek 6 – vpravo). Podruhé se pasta povedla zahustit bez extrémního hrudkovatění. Gravimetricky stanovená koncentrace kompozitu činila 19 %.



Obrázek 8: První tisková formulace sražená mletím (vlevo) a zahříváním (vpravo).

4.2.1.3 Druhá tisková formulace

Pro snadnější tisknutelnost muselo být změněno pojivo pro přípravu BaTiO_3 pasty. V laboratoři byl k dispozici polymerní lak Mara Star SR 911 od výrobce Marabu, který je přímo určený na sítotiskové inkoustové formulace, a proto sloužilo jako pojivo pro přípravu vzorků. Pastu tvořila 40% mletá disperze BaTiO_3 a laku Mara Star v hmotnostním poměru 1:3. Pro homogenizaci se před každým tiskem nechala formulace na pár minut promíchat na třepače.

4.2.2 Depozice vrstev

Tisk jednotlivých vrstev probíhal na poloautomatickém sítotiskovém stroji RokuPrint. Hustota sítovinu u používaných sít byla 90 vláken/cm, tvary a rozměry šablon na sítích lze vidět na Obrázku 7. Odtrh síta se pro tisk všech vrstev nastavoval stejně, a to zhruba na 2 mm.

Jako substrát u všech vzorků tištěných kondenzátorů sloužila mikroskopická podložní sklička o rozměrech $76 \times 26 \times 1$ mm. Aby poloha vrstev na substrátu byla pokaždé stejná, musela být sklička určitým způsobem uchycena na jednom místě. Toho bylo docíleno stejně velkými skličky přilepenými na podkladovou desku, mezi které substrátové skličko dokonale zapadlo.



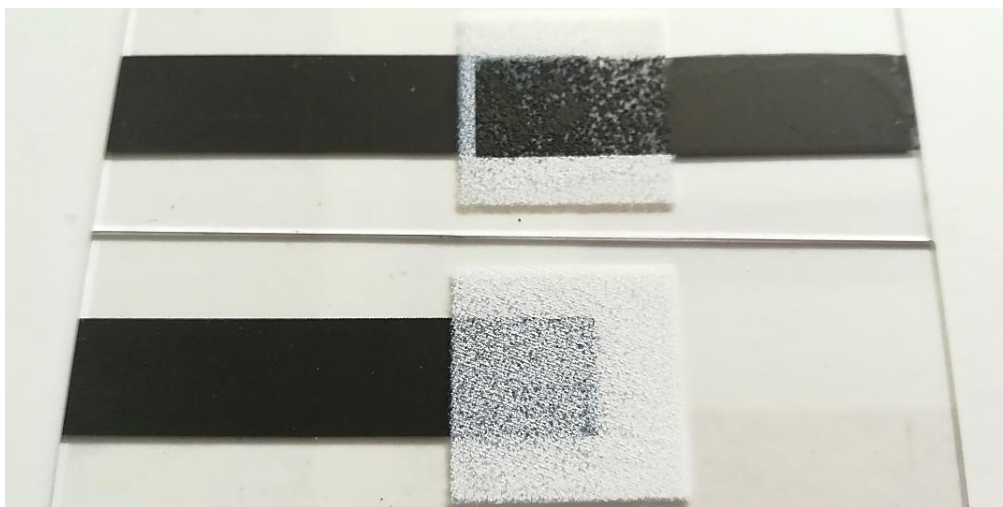
Obrázek 9: Šablonová síta používaná na tisk uhlíkových elektrod (vlevo – proužek o rozměrech 5×1 cm) a BaTiO_3 dielektrické vrstvy (vpravo – větší čtvereček o rozměrech 2×2 cm).

4.2.2.1 Uhlíkové elektrody

Pro spodní a vrchní elektrodu se jako materiál používala vodivá uhlíková pasta na tisk od výrobce Henkel. Vzhledem k tixotropnímu charakteru pasty byla rychlost těrky nastavena na 100% a vedle těrky se také používala předtěrka, která pastu zpětně roztírala po sítu. Po natištění se vrstvy nechaly vysušit na topné desce při 90°C do odpaření rozpouštědel (cca. 3-5 minut).

4.2.2.2 První tisková formulace

Pomocí nemleté a mleté pasty (formulace N1 a M) bylo nejdříve natištěno 6 + 6 vzorků se 3, 4 a 5 vrstvami BaTiO_3 . Při tisku byl problém s rychlým zasycháním pasty na sítu, proto se v místě tisku muselo kvůli ulpívání pasty v sítovině před každým přetiskem pořádně vyčistit pomocí univerzálního čističe. Sušení probíhalo stejně jako u uhlíkových elektrod, tedy při 90 °C. Měřením pomocí digitálního multimetru bylo zjištěno, že u všech vzorků došlo ke zkratu. Příčinou byla pravděpodobně nekompaktní struktura vrstvy, viditelná i pouhým okem (viz Obrázek 8). Přetiskem horní elektrodou proto uhlíková pasta procházela přes díry ve vrstvě a dotýkala se elektrody spodní. Při používání formulace N2 nastal problém již během tisku, kdy došlo k úplnému ucpání síta. Proto byl proveden pokus o tisk přes síto s menší hustotou sítoviny (60 vláken/cm), který byl už úspěšný a připraveno tak bylo 5 vzorků s 5 vrstvami dielektrika. Nicméně, i u této série vzorků byl naměřen zkrat, způsobený špatnou izolací vrstvy BaTiO_3 . Všechny vzorky byly proto nepoužitelné, experimentální snaha o přípravu funkčního měřitelného kondenzátoru tudíž následně pokračovala pouze za použití druhé tiskové formulace.



Obrázek 10: Snímky vzhledu vrstev BaTiO_3 , připravených pomocí první tiskové formulace. Dole samotná vrstva BaTiO_3 na spodní uhlíkové elektrodě, nahoře se znázorněním přetisku vrchní elektrody.

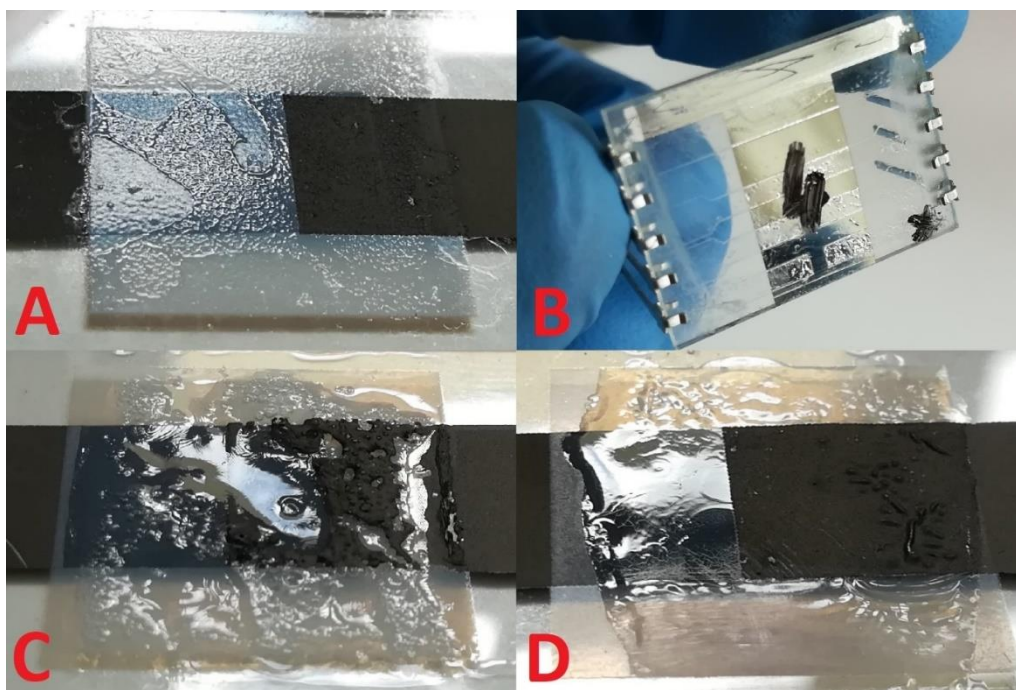
4.2.2.3 Druhá tisková formulace

Druhá formulace se tiskla podstatně lépe než první, zase se však muselo síto v místě tisku průběžně čistit. Sušení vrstev probíhalo stejně jako u první formulace. Nejprve se připravilo 6 vzorků po 1, 2 a 3 vrstvách dielektrika, všechny však byly zkratované. Pro zabránění pronikání uhlíkové pasty přes dielektrickou vrstvu se následně pokusně připravily vzorky s dodatečným zesíťováním pojiva ve vrstvě BaTiO_3 . Síťování se provádělo teplotně (30 minut na topné desce při 180 °C), plazmochemicky (působení plazmy po dobu 1 minuty na přístroji pro plazmochemické opracování od CEPLANTu) a pomocí UV záření (30 minut od UV lampou). Bohužel ani tyto vzorky se nepovedlo připravit nezkratované. Testován byl i vliv přítlaku těrky při přetisku horní elektrody, každopádně i s minimálním přítlakem došlo ke zkratu. Po pozorování vrstev pod mikroskopem se dospělo k závěru, že hlavní příčinou

zkratu je výskyt mikropórů v celém objemu vrstvy BaTiO_3 (více v kapitole 5.14.3.1), které není možné eliminovat pouhým síťováním.

Ve snaze o přípravu funkčních vzorků se provedl pokus o vyplnění pórů nakápnutím pojiva SiBi, které zbylo z předchozích experimentů, přes vrstvu. Tím se konečně podařilo získat nezkratovaný vzorek. Nakápnutá vrstva SiBi však neměla konstantní tloušťku, a proto se nanášení vyzkoušelo metodou spin coatingu. Vzorek se nejdříve zakryl mimo místa pro nános SiBi izolepovou páskou a pomocí oboustranné izolepy se uchytil na podkladovou kulatou desku. Mikropipetou se nanese 160 μl do středu sklíčka a spin coater byl uveden do provozu. Rychlost a čas rotace vzorku byly předem nastavené na 1000 rpm a 15 s. Vzhledem k nízké adhezi pojiva k povrchu BaTiO_3 vrstvy došlo k nerovnoměrnému a velmi tenkému nános (viz Obrázek 9 – A), který posléze vedl ke zkratu. Navíc je tento způsob nanášení vrstev nevhodný pro selektivní nanášení, jelikož může dojít k poškození vzorků přilepenou izolepou.

V průběhu procesu nanášení vrstev SiBi pomocí spin coatingu se pro studium hodnoty relativní permitivity samotného materiálu SiBi rovnou připravily vhodné vzorky k měření. Jako spodní elektroda zde sloužilo sklíčko s tenkou vrstvou ITO, vrchní stříbrná elektroda byla připravena vakuovým napařováním. Funkční vzorek, kontaktovaný kovovými nožkami pro měření na impedančním analyzátoru, je znázorněn na Obrázku 9 – B.



Obrázek 11: Snímky vrstev SiBi. A – depozice pomocí spin coatingu, B – ITO sklíčko s vrstvou SiBi a stříbrnou elektrodou, C – 1 vrstva rozetřeného objemu 80 μl SiBi, D – 2 vrstvy rozetřeného objemu 40 μl SiBi.

Obrázek 9 – C, D znázorňují strukturu vrstvy, připravené rozetřením nakapaného objemu SiBi pomocí sklíčka. Pro tento způsob nanášení vrstev SiBi bylo používáno zahuštěné pojivo o hmotnostní koncentraci 38 %, aby při roztírání nestékalo po sklíčku. Nejprve byla v rámci experimentu připravena 1 vrstva rozetřeného objemu 40 μl SiBi na vzorky s 1 a 4 vrstvami BaTiO_3 , přičemž nezkratoval pouze vzorek se 4 vrstvami. Poté byla připravena série vzorků

s počtem 1, 2, 3 a 4 vrstev BaTiO₃. Položením rozetřeného dvojnásobného objemu SiBi (tedy 80 µl) na topnou rozežhátou desku vrstva začala měnit svoji povrchovou strukturu vytvářením vzduchových bublin a prasklin. Vzhledem k nevhodně strukturovanému povrchu pro přetisk uhlíkové elektrody byly takové vzorky pro jednotlivé počty vrstev BaTiO₃ připraveny pouze jednou, a to s označením písmenem A. Ostatní vzorky v sérii měly vrstvu SiBi tvořenou 2 vrstvami, připravenými rozetřením dvakrát 40 µl objemu SiBi. Takové vzorky se pro rozlišení při jejich analýze označovaly písmeny B-F. I zde se vyskytoval vznik prasklin a nehomogenita, ale ve značně menší míře, přetisk uhlíkových elektrod byl tak mnohem snadnější.

4.2.3 Ošetření vrstev

Druh a stupeň úpravy vrstev se volil podle druhu a funkce materiálu tvořícího strukturní mezivrstvu. Kompaktnost a odolnost uhlíkových elektrod je určena samotným výrobcem tiskové uhlíkové pasty, a proto snaha o zlepšení jejich vlastností speciální úpravou není potřeba. Pasta se tedy pouze nechala vysušit při 90 °C. Jednotlivé vrstvy BaTiO₃ se mezi jednotlivými přetisky sušily stejně jako uhlíková pasta. Navíc se však pro zlepšení homogenity vrstvy využívalo tepelného sítování pojiva při teplotě 180 °C po dobu 30 minut. A nakonec, vrstva SiBi vedle sušení podléhala sítování pomocí plazmy. Sušení jednotlivých nánosů probíhalo při 120 °C po dobu 15 minut. Pro plazmochemické ošetření vrstev SiBi byl použit přístroj s technologií difuzního koplanárního bariérového výboje²⁶. Vzorek byl vystavený účinku generované plazmy po dobu 1 minuty.

4.3 Měření vzorků

4.3.1 Optická mikroskopie

Pomocí soustavy optického mikroskopu s digitálním fotoaparátem D5000 od výrobce Nikon byly se čtyřnásobným a desetinásobným zvětšením okuláru vyfoceny tištěné vrstvy BaTiO₃. Nastavení délky expozice a ukládání fotek zprostředkovával program Camera Control Pro 2.6. Míra osvětlení vzorku byla nastavována ručně.

4.3.2 Profilometrická měření

Tloušťka všech vzorků byla měřena pomocí kontaktního profilometru DektakXT od výrobce Bruker. Průběh měření byl ovládán za pomoci programu Vision 64. Nejprve se podkladovou desku přístroje pod snímacím hrotem položil substrát, na nějž hrot poté pomalu dosednul. Startovací pozice hrotu byla umístěna tak, aby se pro referenci nejdříve nasnímalo zhruba 0,5 mm substrátu. Před zahájením měření byly v programu nastaveny parametry určující dobu, délku, rozlišení a rozsah měření. Tyto parametry se pro různé typy vrstev a vzorků mírně lišily. Z naměřených profilometrických křivek se poté pomocí funkce PRŮMĚR a SMODCH.VÝBĚR.S v programu MS Office Excel vyhodnocovala průměrná tloušťka vrstev (a jejich nejistota).

4.3.3 Impedanční spektroskopie

Pokud nebyl u vzorku s vrstvou SiBi naměřen na multimetru zkrat, nechal se dále proměřit pomocí impedančního analyzátoru, to ve frekvenčním rozsahu 10⁰-10⁶ Hz. Při výpočtu

relativní permitivity se na vzorky nahlíželo jako na soustavu dvou sériově zapojených kondenzátorů, pro celkovou (efektivní) kapacitu platí tedy obecný vztah:

$$C_{ef} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (5)$$

Pro součástku tvořící 2 dielektrika (vrstva BaTiO₃ a vrstva SiBi) s danou hodnotou relativní permitivity ε_1 a ε_2 a tloušťky d_1 a d_2 byl kombinací rovnic (2) a (5) odvozen vztah pro kontrolní výpočet efektivní relativní permitivity:

$$\varepsilon_{ef, \text{ výp. }} = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 (d_1 + d_2)}{\varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 d_1} \quad (6)$$

Veličiny ε a d se pro jednoduchost zápisu označovaly indexem 1 pro vrstvu BaTiO₃ a indexem 2 pro SiBi. Dále bylo potřeba odvodit vztah pro výpočet nejistoty stanovení $\varepsilon_{ef, \text{ výp. }}$, a to podle způsobu výpočtu nejistoty tzv. nekorelovaných veličin. Výpočet se provádí pomocí parciálních derivací efektivní permitivity podle tloušťky a permitivity jednotlivých složek dielektrika. Výsledný vzorec potom vypadá takto:

$$\Delta \varepsilon_{ef, \text{ výp. }} = \sqrt{\left((\Delta \varepsilon_1)^2 \left[\frac{\varepsilon_2^2 (d_1 + d_2) d_1}{(\varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 d_1)^2} \right]^2 + (\Delta \varepsilon_2)^2 \left[\frac{\varepsilon_1^2 (d_1 + d_2) d_2}{(\varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 d_1)^2} \right]^2 + \right.} \quad (7)$$

$$\left. + (\Delta d_1)^2 \left[\frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) d_2}{(\varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 d_1)^2} \right]^2 + (\Delta d_2)^2 \left[\frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) d_1}{(\varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 d_1)^2} \right]^2 \right)$$

Pomocí kombinace rovnic (2), (5) a (6) byl poté odvozen vztah pro stanovení experimentálně získané hodnoty efektivní relativní permitivity, kde hodnota C_{ef} je dána reálnou částí frekvenčně závislé hodnoty naměřené komplexní kapacity:

$$\varepsilon_{ef, \text{ exp. }} = \frac{C_{ef} (d_1 + d_2)}{\varepsilon_0 S} \quad (8)$$

Výsledná experimentálně získaná hodnota relativní permitivity dielektrika je nakonec dána průměrem konstantní části křivky grafické závislosti $\varepsilon_{ef, \text{ exp. }}$ na frekvenci, a to výpočtem pomocí funkce PRŮMĚR v MS Office Excel. Funkcí SMODCH.VÝBĚR.S se poté stanovila nejistota měření.

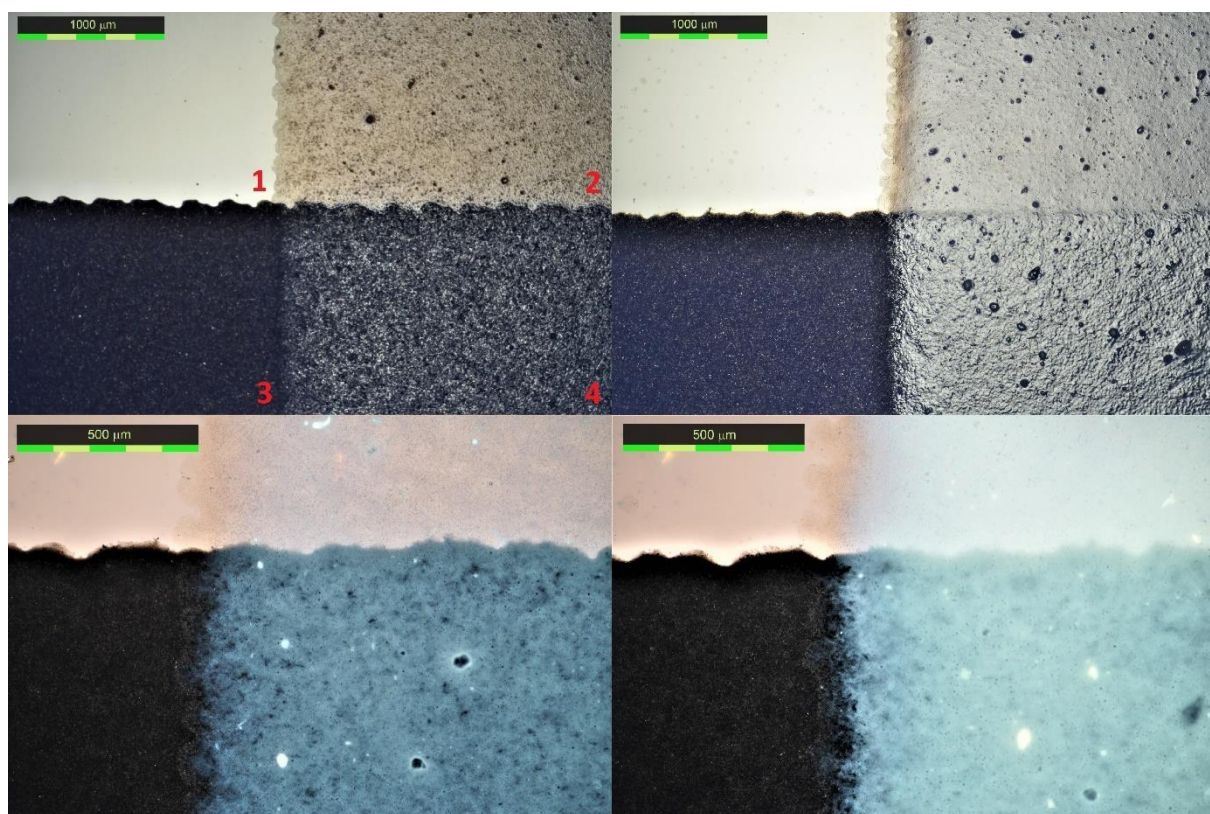
Geometrické parametry jednotlivých vrstev tvoří proměnné veličiny, které se lišily pro každý vzorek. Aktivní plocha S je dána plochou, ve které docházelo ke styku všech tří vrstev, a její rozměry se měřily pomocí pravítka. Tloušťky d_1 a d_2 jsou dané výstupem profilometrických měření. Hodnoty relativních permitivit ε_1 a ε_2 jednotlivých vrstev byly získány impedanční analýzou kondenzátorů se samostatnými vrstvami SiBi a BaTiO₃. Pro BaTiO₃ se počítalo s hodnotou $\varepsilon_1 = 63 \pm 4$, která byla naměřená při nezávislém experimentu a považovala se pro účely této práce za hodnotu tabelovanou. Relativní permitivita ε_2 SiBi se stanovila měřením vlastního vzorku.

5 VÝSLEDKY A DISKUZE

5.1 Optická mikroskopie

Pro vysvětlení příčiny zkratů bylo potřeba zjistit, zda je BaTiO_3 kompaktní, a tedy zda je schopní uhlíková vrstva dokonale chráněna před stykem s horní elektrodou. Na pohled pouhým okem se vrstva zdála být velmi homogenní, a proto byl pro detailnější pozorování v mikroskopickém měřítku použit optický mikroskop. Na Obrázku 10 jsou pro porovnání přiloženy vyfocené snímky 1 a 3 vrstev BaTiO_3 při čtyřnásobném a desetinásobném zvětšení okuláru.

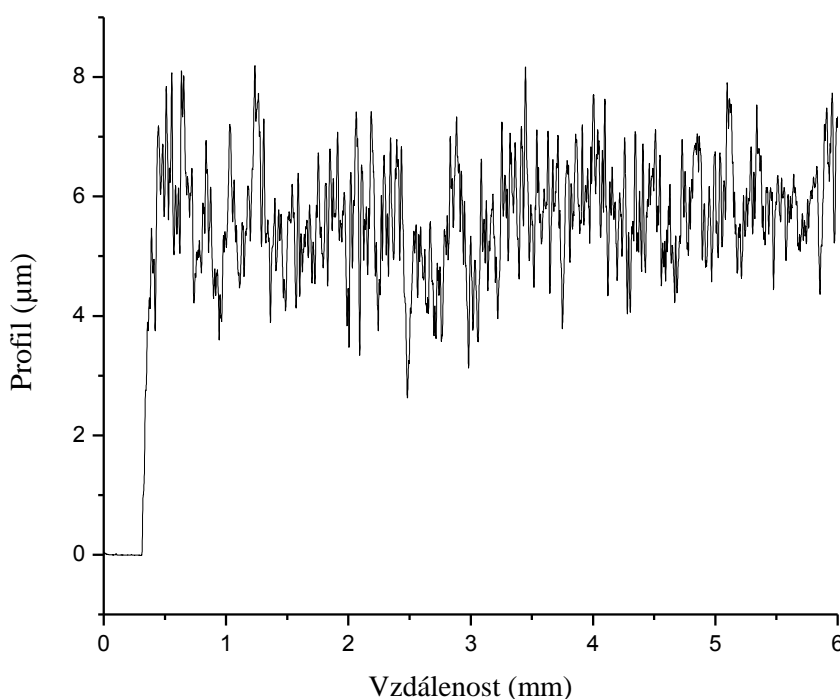
Zvýšením počtu vrstev se potvrdil předpoklad snížení opacity (průhlednosti) vrstvy, kterou způsobuje větší koncentrace nanočástic prášku BaTiO_3 ve vrstvě. Při desetinásobném zvětšení je u 1 vrstvy patrná velmi vysoká pórovitost. U 3 vrstev už není tolik viditelná, ale pořád se tam ve velkém počtu jisté mikropóry vyskytují.



Obrázek 12: Snímky z optického mikroskopu s vloženými měřítky. Porovnání 1 vrstvy (levý sloupec) a 3 vrstev (pravý sloupec) BaTiO_3 přetištěného přes uhlíkovou elektrodu. Rozdělení na jednotlivé části jsou znázorněny na prvním snímku - substrátové sklíčko (1), vrstva BaTiO_3 na sklíčku (2), uhlíková elektroda (3) a vrstva BaTiO_3 na elektrodě (4).

5.2 Profilometrická měření

Tloušťka uhlíkových elektrodových vrstev byla průměrem ze všech profilometrických měření stanovena na $6 \pm 1 \mu\text{m}$. Obrázek 11 představuje profil jednoho vybraného vzorku ze série měřených elektrod. Vysoké odchylky v tloušťce vypovídají o drsnosti povrchu uhlíkových vrstev, která je pozorovatelná i pouhým okem. Právě drsnost podkladové elektrody má značný vliv na nedokonalý přetisk dielektrickou vrstvou, a tudíž nedokonalou izolaci.

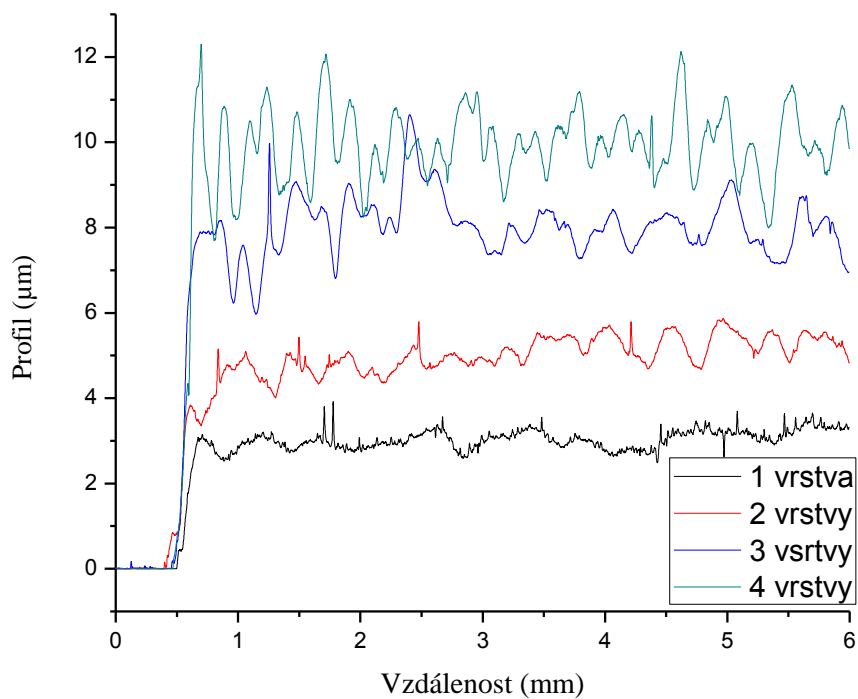


Obrázek 13: Profilometrické měření uhlíkové elektrodové vrstvy u jednoho vybraného vzorku.

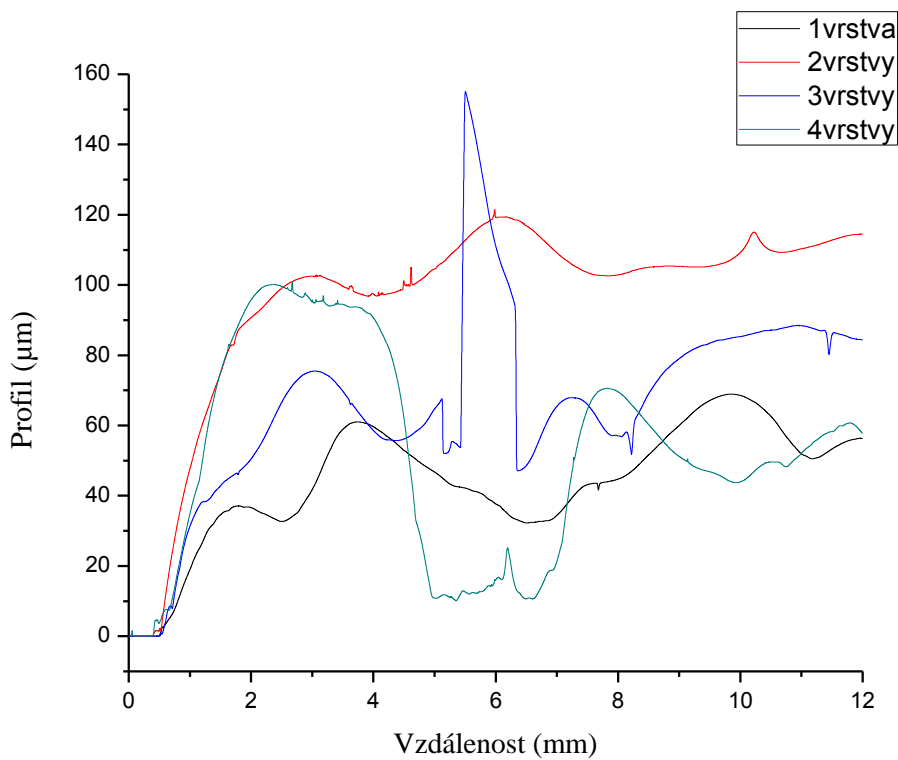
Tloušťka vrstvy BaTiO_3 se lišila v závislosti na počtu na sobě natištěných vrstev. Z průměrných hodnot výstupů profilometrického měření byly proto stanoveny tloušťky pro jednotlivé počty vrstev, které zobrazuje Tabulka 1. Na Obrázku 12 lze pak vidět grafické výstupy profilometrických měření BaTiO_3 vrstvy, a to pro jednotlivé počty vrstev. Z grafu je viditelné, že se zvyšujícím se počtem vrstev se kromě tloušťky zvětšovala i jejich drsnost.

Tabulka 1: Průměrné hodnoty tloušťky vrstvy BaTiO_3 v závislosti na počtu vrstev.

Počet vrstev [-]	Tloušťka [μm]
1	$2,6 \pm 0,4$
2	$5,1 \pm 0,3$
3	$7,9 \pm 0,7$
4	11 ± 2



Obrázek 14: Profilometrická měření samotné vrstvy BaTiO_3 u vybraných vzorků s 1, 2, 3 a 4 vrstvami BaTiO_3 .

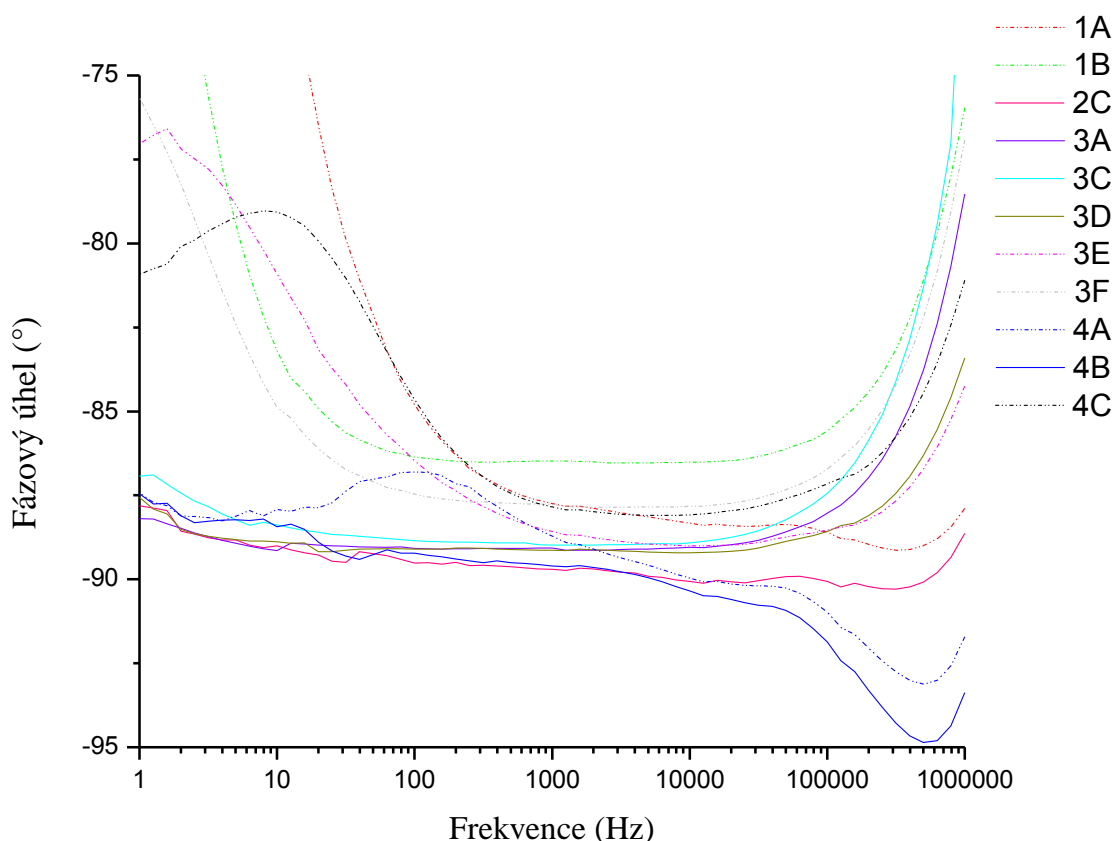


Obrázek 15: Profilometrická měření vrstvy SiBi na BaTiO_3 vrstvě u vybraných vzorků s 1, 2, 3 a 4 vrstvami BaTiO_3 .

Na Obrázku 13 je pro ukázkou znázorněno pár vybraných křivek z profilometrického měření vrstvy SiBi nanesené přes vrstvu BaTiO₃. Povrch a tloušťka těchto vrstev byla velmi různorodá, což se promítlo i na tvarech těchto křivek. Vzhledem k velkým výchyilkám v tloušťce proto nemá smysl určovat průměrnou hodnotu tloušťky vrstvy SiBi napříč všemi vzorky. Tloušťka naměřených vzorků se pohybovala v rozmezí hodnot od 40 μm až do 350 μm.

5.3 Impedanční spektroskopie

Série nezkratovaných vzorků s označením 1A, 1B, 2C, 3A, 3C, 3D, 3E, 3F, 4A, 4B, 4C (čísla poukazují na počet vrstev BaTiO₃) byla podrobena impedančnímu měření. Na Obrázku 14 jsou graficky znázorněny křivky frekvenční závislosti fázového úhlu, jehož hodnoty byly naměřeny impedančním analyzátozem. Z grafu je patrné, že se tyto vzorky v jistém rozsahu frekvencí přibližují chování ideálního kondenzátoru, který má hodnotu fázového úhlu -90° . Křivky znázorněné čárkovanou čarou se chování ideálního kondenzátoru přibližovaly pouze v malém rozmezí frekvencí. Obvykle se to týkalo řádově rozsahu 10^2 - 10^5 Hz, což je pro účely experimentu postačující.



Obrázek 16: Grafická závislost fázového úhlu na frekvenci pro všechny měřené vzorky.

Nejprve byla pro materiál SiBi stanovena průměrná hodnota relativní permitivity na $\epsilon_2 = 1,92 \pm 0,05$, se kterou se následně počítalo při vyhodnocování relativní permitivity vzorků. Ze zadaných parametrů a naměřených hodnot kapacity a fázového úhlu, se vhodnými přepočty (uvedenými v kapitole 4.3.3) pro každý vzorek následně stanovila

hodnota $\varepsilon_{ef, \text{výp}}$ a $\varepsilon_{ef, \text{exp.}}$, včetně jejich nejistot. Souhrn výsledných hodnot permitivit obsahuje Tabulka 2, přiloženy jsou i hodnoty průměrné tloušťky vrstvy SiBi a průměrné hodnoty efektivní kapacity u jednotlivých vzorků.

Tabulka 2: Výsledné hodnoty efektivních permitivit a kapacity funkčních vzorků a tloušťka SiBi.

Vzorek	d_2 [μm]	C_{ef} [F]	$\varepsilon_{ef, \text{výp}}$ [-]	$\varepsilon_{ef, \text{exp}}$ [-]
1A	325 ± 111	$(3,5 \pm 0,6) \cdot 10^{-12}$	$1,94 \pm 0,05$	$2,19 \pm 0,02$
1B	98 ± 11	$(2,8 \pm 0,4) \cdot 10^{-11}$	$1,97 \pm 0,07$	$4,12 \pm 0,07$
2C	99 ± 9	$(1,9 \pm 0,1) \cdot 10^{-12}$	$2,0 \pm 0,2$	$1,078 \pm 0,006$
3A	182 ± 124	$(3,9 \pm 0,1) \cdot 10^{-11}$	$1,99 \pm 0,07$	$10,05 \pm 0,01$
3C	75 ± 11	$(5,3 \pm 0,3) \cdot 10^{-11}$	$2,1 \pm 0,3$	$6,6 \pm 0,1$
3D	45 ± 6	$(1,4 \pm 0,5) \cdot 10^{-11}$	$2,2 \pm 0,1$	$2,25 \pm 0,03$
3E	100 ± 51	$(1,3 \pm 0,1) \cdot 10^{-11}$	$2,1 \pm 0,1$	$2,92 \pm 0,05$
3F	74 ± 8	$(3,8 \pm 0,5) \cdot 10^{-11}$	$2,13 \pm 0,06$	$4,57 \pm 0,03$
4A	151 ± 43	$(1,9 \pm 0,2) \cdot 10^{-12}$	$2,07 \pm 0,07$	$1,2 \pm 0,2$
4B	107 ± 14	$(1,8 \pm 0,2) \cdot 10^{-12}$	$2,11 \pm 0,06$	$1,14 \pm 0,04$
4C	97 ± 65	$(2,0 \pm 0,4) \cdot 10^{-11}$	$2,1 \pm 0,1$	$3,17 \pm 0,02$

Jelikož tloušťka vrstvy BaTiO₃ se v rámci série vzorků mění jen o pár mikrometrů, výsledná hodnota relativní permitivity soustavy by měla významně záviset na tloušťce vrstvy SiBi. Ta je z tabulky zřejmá, tedy čím tlustší měl vzorek vrstvu SiBi, tím více se hodnota vypočtené relativní permitivity blížila permitivitě samotného SiBi. Nicméně, u naměřených hodnot se tento trend nenachází. Například vzorek 3A disponoval velmi tlustou vrstvou SiBi, ale jeho experimentální relativní permitivita má dokonce o řád vyšší hodnotu než je hodnota vypočtená.

Pro porovnání vlivu aktivní plochy a tlouštěk vrstev na výslednou hodnotu $\varepsilon_{ef, \text{exp}}$ jsou v tabulce zobrazeny průměrné hodnoty naměřené efektivní kapacity vzorku. Poměrově jsou tyto hodnoty zhruba odpovídající, nicméně problém nastal u vzorků s velmi nízkými středními hodnotami efektivní kapacity, tedy vzorků 2C, 4A a 4B. Přepočet na hodnotu efektivní relativní permitivity byl velmi citlivý na velikost aktivní plochy, přičemž se hodnota $\varepsilon_{ef, \text{exp}}$ mohla výchylkou o pouhý 0,1 cm při výpočtu rovnat hodnotám menším než 1. Vzhledem k nejistotě měřícího pravitka proto není možné určit naprosto přesnou hodnotu aktivní plochy, která má významný vliv na konečnou hodnotu.

Při pomnutí zmíněných špatně vyhodnocených vzorků se však $\varepsilon_{ef, \text{exp}}$ a $\varepsilon_{ef, \text{výp}}$ od sebe svými hodnotami liší v relativně malé míře. Nicméně, vzhledem k mnoha proměnným parametrům, na kterých jsou závislé všechny přepočty, se tyto hodnoty nedají vyhodnocovat jako absolutní.

6 ZÁVĚR

Cílem bylo připravit a charakterizovat funkční vzorky tištěných izolačních mezivrstev na bázi BaTiO_3 , což se v rámci práce podařilo. Tomu však předcházela série neúspěšných experimentů, které vedly k optimalizaci přípravy dielektrické vrstvy. Bylo zjištěno, že organokřemičitého pojivo (SiBi) nevyhovuje podmínkám tisku, tedy že ho nelze používat jako pojivo pro nanočástice BaTiO_3 pro pastu na síťotisk.

Vzorky měly strukturu tištěného deskového kondenzátoru, tvořeného dielektrikem mezi dvěma uhlíkovými elektrodami. Konečná dielektrická vrstva se sestávala z 2 materiálů – kapalně tiskové kompozice BaTiO_3 a roztoku SiBi. Složení tiskové kompozice bylo primárně dáno použitým pojivem, nakonec se používalo pojivo komerčně dostupné. SiBi zde sloužila jako přídavná komponenta dielektrické vrstvy a měla za úkol snížení nehomogenity vrstvy BaTiO_3 . Tisk kondenzátoru se samotnou vrstvou BaTiO_3 vedl ve všech případech ke zkratu, jelikož ve své struktuře obsahovala mikropóry.

Z naměřených frekvenčních závislostí je patrné, že se vzorky v celém rozsahu frekvencí nechovaly jako ideální kondenzátor. Výsledné hodnoty relativní permitivity připravené série vzorků též vypovídají o značné neideálnosti součástky. Přesnost měření se odvíjela především od přesnosti změřené tloušťky a aktivní plochy vrstev. Především připravené vrstvy SiBi měly velmi různorodou nehomogenní strukturu, a proto nebylo možné tyto parametry přesně definovat. Dalo by se také předpokládat, že výsledná hodnota relativní permitivity je významně ovlivněna vrstvou SiBi, a to vzhledem k několikanásobně větší tloušťce, než měly vrstvy BaTiO_3 . Hodnota naměřené relativní permitivity se v rámci série vzorků pohybovala v rozmezí hodnot 1-10,06, přičemž typické byly hodnoty kolem 2-4.

Pro reálnou aplikovatelnost tištěných izolačních vrstev je nutné poznatky a podmínky přípravy dielektrické vrstvy z této práce v budoucnosti ještě dále optimalizovat. Při přípravě vrstvy BaTiO_3 se pracovalo pouze s jednou hmotnostní koncentrací plnidla v pojivě (v poměru 1:3), a proto by se mohla provést studie závislosti dielektrické účinnosti na obsahu (koncentraci) dielektrika ve vrstvě. Zároveň by se pro zlepšení homogenity vrstvy mohly prozkoušet jiné techniky materiálové tisku. Přínosná by mohla být zejména příprava vrstev pomocí inkjetového tisku, který by byl schopný poskytnout uniformnější vrstvy s větším rozlišením. Navíc by se vzhledem k nárokům na nízkou viskozitu inkoustové formulace u inkjetového tisku mohlo případně pracovat s původní formulací, zkoumanou v této práci, kde pojivem byl 20% roztok SiBi. Ta by se tedy nemusela zahušťovat a nedocházelo by ke srážení.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Sharpe AG, Housecroft CE. *Anorganická chemie*. 1 ed. Praha: VŠCHT; 2014.
2. Sebastian MT. Dielectric materials for wireless communication. 2008.
3. Ahn CH, Rabe KM, Triscone JM. Ferroelectricity at the Nanoscale: Local Polarization in Oxide Thin Films and Heterostructures. *Science*. 2004;303(5657):488.
4. Damjanovic D. Ferroelectric, dielectric and piezoelectric properties of ferroelectric thin films and ceramics. In. Vol 61. UK: Rep. Prog. Phys.; 1998:1267–1324.
5. Šavel J. Elektrotechnologie. In. *materiály, technologie a výroba v elektronice a elektrotechnice*. Praha: BEN - technická literatura; 2005.
6. Hassdenteufel J. *Elektrotechnické materiály*. In. Bratislava: Alfa; 1971.
7. Kolasinski KW. *Physical Chemistry : How Chemistry Works*. New York, UNITED KINGDOM: John Wiley & Sons, Incorporated; 2016.
8. Hofmann J, Urbanová M. *Fyzika I*. 3 ed. Praha: VŠCHT; 2011.
9. Services SE. Study of dielectric constant Model: DEC-01. In.
10. Rose A. Considerations in Formulation and Manufacturing of Thick Film Inks. *ElectroComponent Science and Technology*. 1981;9(1):43-49.
11. Kipphan H. *Handbook of Print Media: Technologies and Production Methods*. Springer; 2001.
12. Kaplanová M. Moderní polygrafie. In. Praha: Svaz polygrafických podnikatelů; 2009.
13. Thwaite EG. Surface Topography Measurement and Analysis*. In. Vol 35: Aust. J. Phys.; 1982:777-784.
14. Mandát D. Optické bezkontaktní topografické metody. In. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci; 2012.
15. Macdonald JR. Impedance spectroscopy. In. Vol 20. USA: Annals of Biomedical Engineering; 1992:289-305.
16. Tatarkovič M, Broncová G, Krondák M. Elektroimpedanční spektroskopie a její využití v chemické analýze. In. Vol 106: Chem. Listy; 2012:1067-1074.
17. Umerova S, Dulina I, Ragulya A, Konstantinova T, Glazunova V. *Rheology of plasticized screen printing pastes based on BaTiO₃ nanopowder*. Vol 262016.
18. Cui Z, Qiu S, Zhou C, et al. *Printed Electronics: Materials, Technologies and Applications*. Wiley; 2016.
19. Kantola V, Kulovesi J, Lahti L, Lin R, Zavodchikova M, Coatanéa E. Printed Electronics, Now and Future. In: *Bit bang – rays to the future*. Aalto University School of science and technology; 2009:63-102.
20. Park S, Kim C-H, Lee W-J, Sung S, Yoon M-H. Sol-gel metal oxide dielectrics for all-solution-processed electronics. *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2017;114:1-22.
21. Khan S, Lorenzelli L, Dahiya RS. Technologies for Printing Sensors and Electronics Over Large Flexible Substrates: A Review. *IEEE Sensors Journal*. 2015;15(6):3164-3185.
22. Karasová A, Nistor A. Optická (světelná) mikroskopie.

23. Mariotti C, Cook BS, Roselli L, Tentzeris MM. State-of-the-Art Inkjet-Printed Metal-Insulator-Metal (MIM) Capacitors on Silicon Substrate. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. 2015;25(1):13-15.
24. Yu YY, Jiang AH, Lee WY. Organic/Inorganic Nano-hybrids with High Dielectric Constant for Organic Thin Film Transistor Applications. *Nanoscale Research Letters*. 2016;11:9.
25. McKerricher G, Maller R, Mohammad V, McLachlan MA, Shamim A. Inkjet-printed thin film radio-frequency capacitors based on sol-gel derived alumina dielectric ink. *Ceramics International*. 2017;43(13):9846-9853.
26. Low-cost plasma equipment. In. <https://ceplant.cz/equipment-and-services/low-cost-plasma>

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

μl	mikrolitr
μm	mikrometr
AC	střídavý proud
C	kapacita
C_{ef}	efektivní kapacita
d	tloušťka
EIS	elektrochemická impedanční spektroskopie
E_P	elektrická pevnost
eV	elektronvolt
F	farad
Hz	hertz
IS	impedanční spektroskopie
ITO	oxid cínu a india
MIM	kov-izolant-kov (kondenzátor)
OTFTs	organické tenkovrstvé tranzistory
Q	náboj
R	reaktance
RC	obvod s rezistorem a kondenzátorem
RL	obvod s rezistorem a induktorem
RLC	obvod s rezistorem, induktorem a kondenzátorem
rpm	otáčky za minutu
S	plocha
SiBi	organokřemičité pojivo
$\tan \delta$	ztrátový činitel
UV	ultrafialové záření
X	rezistance
Z	impedance
ε	celková permitivita
ε_0	permitivita vakua
$\varepsilon_{ef, exp}$	experimentální efektivní relativní permitivita
$\varepsilon_{ef, výp}$	vypočtená efektivní relativní permitivita
ε_r	relativní permitivita
φ	fázový úhel